GPS 受信機基板を用いた地震観測用高精度時計の製作

東北大学理学部地震予知・噴火予知観測センター* 森 田 裕 一

東北大学理学部宇宙地球物理学教室** 西 村 太 志

Standard Clock for Seismic Observations Using GPS Receiver Board

Yuichi MORITA

Observation Center for Prediction of Earthquakes and Volcanic Eruptions, Faculty of Science,
Tohoku University, Aoba-ku, Sendai 980, Japan

and Takeshi NISHIMURA

Geophysical Institute, Faculty of Science, Tohoku University, Aoba-ku, Sendai 980, Japan

(Received March 3, 1993; Accepted May 25, 1993)

Even in the recent years, the accurate timing system is the most important and effective tool for temporally aligned seismic observation. Nowadays, with the advance of the electric and electronic technology, we can purchase small GPS receiver board with very cheap price. Since the GPS receiver boards output precise timing pulse, we complete accurate standard clock for seismic observation using the GPS receiver boards.

At first, in order to check the performance of the GPS receiver boards (Magnavox, GPS Engine), we compare the timing pulse from the board and the atomic clock at the Mizusawa Kansoku Center National Astronomical Observatory. We find out that the precision of the timing pulse from the GPS receiver board is usually within 0.1 micro-seconds. The precision reduces up to 3 micro-seconds, when the number of available GPS satellites decreases. Even with worst precision, the timing pulse from the GPS receiver is enough accurate for correcting the clock for seismic observation. Using the GPS receiver board, we produce the standard clock for seismic observation. The 8-bit micro-computer, whose current consumption is very small, controls the GPS receiver board, displays current time and generates time codes. Considering that the GPS receiver consumes much current, the temperature compensated crystal oscillator is usually used for time base and corrected by the GPS receiver at proper time intervals. The accuracy of the standard clock is always within 2 msec, and its current consumption is about 35 mA. Its weight is about 1 kg and its size is small. It is good for the field works.

Key words: Standard clock, GPS receiver, Seismic observation.

§1. はじめに

震源決定の精度の向上はひとえに時計の精度の向上によるところが多い。現在はテレメータ装置が普及し、テレメータで集められた記録から震源決定することが多くなり、必ずしも正確な絶対時刻が必要ではなくなった。しかし、異なった観測網の観測結果を比較したり、臨時観測でデータロガーを利用する際には、各観測網の基準時計のずれやデータロガーの時計の精度が震源決定精度を大きく左右する。従って、高精度の観測用時計は地震

観測にとって今なお重要な装置である。

現在の日本で用いられている地震観測用の高精度時計は内部に恒温槽付きの 10^{-8} ~ 10^{-7} 程度の精度を持つ水晶を備え、NHK の時報、JJY、JG2AS 等の刻時放送を利用して自動校正する方式がほとんどである。この方式は日本国内においては多くの実績を持ち、信頼性が高い。しかし、JJY 等が受信できない外国での地震観測には適さない。また、恒温槽付きの水晶発振器は消費電力が大きいので、電池での動作が難しく野外観測には向かない。一方、外国での地震観測に適する高精度時計としては世界に 8 点の発信局のある測位用放送オメガを利

*. ** 〒980 仙台市青葉区荒巻字青葉

用した時計がある。この時計は消費電力の少ない製品もある。しかし、GPSの普及に伴って、オメガ放送は閉鎖の方向にあり、永続的に利用できる可能性は少ない。

GPSはオメガ放送に変わる新たな測位システムである。GPSによる単独測位法は4個以上のGPS衛星から送られてくる時報放送の時間差からそれぞれの衛星からの距離を計算し、正確な時刻と受信機の位置を推定する測位法である。各衛星の位置は放送にのせられている軌道情報から求めることができる[例えば、日本測地学会(1989), 土屋・辻(1991)]。GPS衛星に登載されているセシウム時計の精度は 10^{-11} であるので、GPS受信機が出力する時刻情報は標準時計として十分な精度があると思われる。また、GPS受信機は民生品として普及し、近年では単独測位法を用いて自らの位置を表示する低価格で手のひらサイズのものも普及してきている。しかも、その時刻精度は地殻変動観測に用いる高性能の干渉測位用受信機と比べてもそれほど大きな差はない[山崎・他(1991)]。そこで、このような民生用GPS受信機基板の

精度を検定し、それを利用して地震観測用の時計を製作したところ、消費電力が小さく安価で高精度な時計が容易に完成したのでその概要を報告する。

我々は地震観測用高精度時計の設計にあたり、以下のような項目を必要要件と考えた。

- 1) 高精度: 時刻誤差が常時 ± 2 msec 以内であること。
- 2) 低消費電力: バッテリーによっても長時間の動作が可能であること。
- 3) 操作性: 初期設定が不要か、あるいは極めて簡単であること。また自動較正が確実におこなえること。
- 4) 可搬性: 国内及び海外で利用でき、小型で軽量であること。

完成した時計は上記の要件をすべて満足するものであった。

§2. GPS受信機基板の性能試験

現在までに地震観測用高精度時計（以下GPS時計と

Fig. 1. Histogram of the time differences (ΔT) between the standard clock at the Mizusawa Kansoku Center National Astronomical Observatory, and 1 pps output of the GPS receiver (Magnabox, GPS Engine). These time differences are observed every 10 seconds during nearly 24 hours.

呼ぶ) として, 1 号機と 2 号機が試作されている. 両者の違いは GPS 受信機基板の違いである. 1 号機は米国マグナボックス社製 GPS Engine, 2 号機は古野電気社製 GN-72 を用いている. 両者の受信機基板の性能はほぼ同等であるので, ここではマグナボックス社製 GPS Engine の性能を検定した結果を示す.

GPS Engine には毎秒 1 パルス (1 pps) を出力する機能 (秒パルス出力) がある. また, 同時にそのパルスの時刻 (年月日時分秒), 測位結果 (緯度, 経度, 高度), GPS 衛星の受信状況等を無手順シリアル方式で出力する. この秒パルス出力と標準時計とを比較して刻時精度の検定を行った. 標準時計は国立天文台水沢観測セン

Fig. 2. Temporal variations of the time difference (ΔT), and the location (latitude, longitude, altitude) estimated by the GPS receiver. They were observed for the period from 09:00 on Sept. 09 to 09:00 on Sept. 10, 1992. The GPS antenna is located at $39^{\circ}8.10'$ north, $141^{\circ}8.01'$ east, 73 m above the reference ellipsoid. The arrows in the uppermost column indicate the time when number and combination of the GPS satellites which the receiver catch change, and the accuracy of estimated altitude is reduced.

ターの原子時計を利用して頂いた。GPS 受信機基板の秒パルス出力と原子時計のパルスの時間差 (ΔT) を約 1 週間にわたり測定した。水沢センターではすでに高性能の干渉測位用の GPS 受信機の出力と原子時計の差の測定が行われ、その時間的变化も調べられている [田村・他 (1988), 堀合・他 (1989),]。

観測期間中の連続した 24 時間での ΔT の頻度分布を Fig. 1 に、またその時間変化と 3 次元測位結果を Fig. 2 に示す。Fig. 1 から明らかなように ΔT は約 $2\mu\text{sec}$ のオフセットがある (GPS 受信機の方が遅れている) が、ばらつきは $\pm 0.1\mu\text{sec}$ 程度である。我々の観測と同時に水沢観測センターが行っている高性能干渉測位用 GPS 受信機 (トリンブル社製, 4000SX) と原子時計の比較の結果でも約 $2\mu\text{sec}$ のオフセットがあったので、このオフセットは水沢の原子時計と GPS 衛星の基準時計とが測定時点で持っていた差であり、我々が測定した受信機基板の刻時精度の問題ではない。GPS 衛星に登録され

ている時計も衛星毎にわずかながらずれているが、その時間差の情報は GPS 放送から得られ、受信機はその分の時間を補正して秒パルスを出力している。

ΔT はほとんどの場合 $2 \pm 0.1\mu\text{sec}$ であるが、Fig. 2 中の矢印で示した時のように $5\mu\text{sec}$ (偏差約 $3\mu\text{sec}$) 程度まで大きくなる時がある。その時には測位結果のうち特に高度が実際の値と大きく異なる。これは受信機が捕捉している GPS 衛星の数が急激に減少した時や、捕捉している衛星の組み合わせが変化した時に対応している。測位結果の高さ h と ΔT の間には Fig. 3 の様に正の相関があり、推定高度が高いほど GPS 受信機から秒パルスが遅れて出力される。また、傾き ($dh/d(\Delta T)$) は $3 \sim 6 \times 10^8 \text{ m/sec}$ であり電波の伝播速度とほぼ一致している。従って、この ΔT の変化は GPS 受信機の内部で GPS 衛星から受信機までの信号の伝搬時間を計算し、パルス出力のタイミングを補正して出力しているために発生するものであると考えられ、純粋に受信機のソフト

Fig. 3. Relation between the time differences (ΔT) and the estimated altitudes. The ΔT decreases with the estimated altitude. The antenna height is 73 m above the surface of the reference ellipsoid. The variation of ΔT is due to the precision of 1 pps output of the GPS receiver which is compensated for the altitude of the receiver's location. Therefore, the estimated altitude and time difference correlate to each other.

ウェア（ファームウェア）の問題である。2次元測位（高度を固定した測位）モードを選択したときには ΔT はこれほど大きく変化しない。

以上のように、2次元測位モードで利用するか、3次元測位モードの際には推定された高度を監視すれば、GPS 受信機の秒パルス出力は $\pm 0.1 \mu\text{sec}$ の精度で得られることが分かった。このことから、GPS 受信機基板は地震観測用の高精度時計の校正装置としては十分の精度であると言える。

§3. GPS 時計のハードウェア及びソフトウェア

前節で述べたように GPS 受信機は秒パルスと同時にそのパルスの時刻等をシリアル方式で出力している。このシリアル出力を利用することで非常に操作性の良い時計を作ることができる。たとえば、NHK の時報や JYY で自動校正する時計では時計自身の秒パルスを時報のタイミングに合わせて同期させることはできるが、初期設定で時刻を誤って設定すれば、永遠に整数秒だけずれた時刻を刻み続ける。また、動作途中で停電のため一旦時計が停止してしまえば、復電後も時刻を設定し直すまで正確な時刻は得られない。しかし、GPS 受信機を校正装置として用いれば、このシリアル出力される時刻情報を用いて現在の時刻を訂正（確認）できるので、時刻が整数秒ずれることはない。また、停電のため途中で時計が停止しても復電後は自動的に復旧して従来のような人手

による初期時刻設定は不要である。

以上のように GPS 受信機基板はその時刻精度の高さと時刻がシリアル方式で出力される点で時計の校正装置として極めて優れている。しかし、その消費電力は大きい（例えば GPS Engine では $5\text{V} \cdot 0.13\text{A}$ と $7\text{V} \cdot 0.1\text{A}$ の2種類の電源で約 1.4W の電力を、GN-72 では $5\text{V} \cdot 0.4\text{A}$ で約 2W の電力を消費する）ため、常時動作させていたのでは電池での運用を前提とする野外観測には適当でない。そこで我々の試作した GPS 時計では、通常は消費電力の小さい水晶発振器を基準に用い、適当な時間間隔で GPS 受信機を動作させて時計の校正を行うことにした。2号機の機器構成を Fig. 4 に示す。1号機との違いは前節で述べたように GPS 受信機基板を国産のものにしたことと、表示部を発光ダイオードから液晶 (LCD) に変更した点である。

2号機で GPS 受信機基板を国産のものに変更したのは、入手し易さ、低価格（約半額）であること、電源が 5V のみでよく、閏秒にも対応しているためである。しかし、1号機で用いた GPS 受信機は GPS 衛星が1つしか見つからなくても秒パルスを出すのに対して、2号機で用いた受信機は3衛星以上見つからなければパルスを出ししない。1号機の GPS 受信機では2次元測位と3次元測位とが選択できるのに対して、2号機では選択できないなど、機能の点では1号機で用いた受信機のほうが優れている。これは受信機のファームウェアの問題であり、今後は2号機の受信機でも改良が進むと期待

Fig. 4. Block diagram of the GPS clock for seismic observation. The 8-bit CPU (84Z015) controls the GPS receiver and LCD display, and generates the time codes. The TCXO (temperature compensated X'tal oscillator) is usually used for the time base, and corrected by 1 pps output of the GPS receiver at proper time intervals.

される。

Fig. 4 の回路図の中心にあるのがワンボード・コンピュータであり、時刻の管理、GPS 受信機の制御、時刻の表示、タイムコードの発生などを行う。ワンボード・コンピュータには CMOS8 ビット CPU の 84Z015 (Z80CPU+SIO+PIO+CTC+WDT) と 32 KB の RAM が搭載され、プログラムを書き込んだ ROM を IC ソケットに差し込み動作させる。図中の左上に描かれているのが時計の基準パルスをつくる水晶発振器であり、精度 2×10^{-6} ($-10 \sim 40^\circ\text{C}$) の温度補償型水晶発信器 (TCXO) を用いている。12.8 MHz の TCXO のパルスを分周して作った 1 KHz の基準信号は CPU の NMI (マ

スク不可割り込み) 端子に接続され、1 msec 毎に CPU に割り込みをかけている。時刻等の表示用として用いられている 16 文字 2 行の液晶モジュールは CPU ボードの PIO (並列入出力) 端子 11 本 (データ 8 本、制御 3 本) に接続されている。タイムコードは PIO 端子からトランジスターのバッファを通して出力されている。また、GPS 受信機の電源の ON/OFF は、PIO がドライブするラッチングリレーで行っている。GPS 受信機のパルス出力は CTC (時計カウンタ入力) 端子に、シリアル出力は SIO (シリアル信号入出力) の RXD 端子にそれぞれ接続されている。

部品は CPU ボードも含めて約 12×16 cm の基板に

Fig. 5. The flow chart of the program on the CPU which controls the GPS clock for seismic observations. The program is written in assemble language, and developed by personal computer.

登載され、約 $22 \times 17 \times 9$ cm のアルミ製のケースに GPS 受信機 ($3 \times 11 \times 7.5$ cm) とともに納められている。重量は電池を含まず約 1 kg である。GPS 受信機のアンテナはヘリカル型で直径 5 cm 長さ約 30 cm の円筒形である。現用中の 2 号機ではアンテナと受信機の間は 20 m の同軸線 (5D2V) で結ばれ、雷サージ対策として受信機とアンテナの間に同軸用避雷器を接続している。アンテナの内部に増幅器があるのでアンテナと受信機の距離を更に延ばすこともできる。

全体の消費電力は通常時 $5\text{ V} \cdot 30\text{ mA}$ であり、GPS 受信機を動作させている時は $5\text{ V} \cdot 450\text{ mA}$ である。GPS 受信機による校正に必要な時間は 1 回につき 2 分以下であるので、例えば 3 時間に 1 度の割合で校正するとすれば平均消費電力は $5\text{ V} \cdot 35\text{ mA}$ となる。これは単 1 のアルカリ乾電池を 6 つ直列に用いた場合、約 11 日間連続動作が可能な程度の極めて小さな消費電力である。現用中の時計の電源はフロート充電された $12\text{ V} \cdot 6\text{ AH}$ のシールド鉛バッテリーを用いており、1 週間程度続く停電があっても連続して動作する。

この時計を制御する CPU のプログラムのフローチャートを Fig. 5 で示す。このフローチャートで明記されている以外にも複雑な割り込み処理もあり、この図に書き込まれていない部分も若干あるが、全体の処理の主な流れは以下のとおりである。

時計の電源を入れたときには、各種パラメーターを初期設定し、GPS 受信機の電源をいれる。受信機は 1 分半程度で GPS 衛星を見つけ、秒パルスとシリアルデータを出力しはじめる。この秒パルスで時計のカウンターをリセットし、シリアルデータより現在の時刻を得る。以上の初期設定が終了すると受信機の電源を切る。この後、スリープモード (CPU を停止し、低消費電力になる動作) に入る。CPU は 1 msec 間隔でかかる割り込み (NMI) のたびに動作を開始し、時計のカウンターを 1 msec ずつ進める。必要に応じて秒、分、時、日、月、年の繰り上げを行う。次いでタイムコードを発生させ、液晶の表示を更新する。これらの動作が完了すると再びスリープモードに入り次の割り込みを待つ。以上の繰り返しを続けた後、一定時間が経過すると時刻を校正するために再び GPS 受信機の電源を入れる。時刻校正のときには GPS からの秒パルスやシリアル出力の時刻情報を入力するために CPU の仕事は急増するのでスリープモードを利用していない。なお、時刻の管理、タイムコードの発生、時刻の表示等の作業は割り込み処理で行っているので、GPS 受信機が動作中でもタイムコードは中断なく出力される。

タイムコードは 1 分をフレームとするスローコード

Fig. 6. Histogram of the time differences between the GPS clock and the JJY synchronized clock (Echo product Co., Ltd., AQ-1000E). These differences are measured every 10 seconds during 2 days.

と 10 秒をフレームとする IREG-E 規格のコードを出力している。出力するコードの変更や追加もプログラムの変更だけで可能である。液晶表示器は通常は時刻と最新の時刻校正情報を表示する。表示モード切り替えスイッチを押すと表示が観測点位置 (緯度、経度、高度) に変わる。もし他の情報 (例えば GPS 衛星の受信状況) も表示したければ、これもプログラムを変更するだけで可能である。

以上のようにプログラムの工夫や変更により機能の充実や性能の向上が見込める。プログラムの開発にはパーソナルコンピューターを用い、完成後のプログラムをロムライターで ROM に書き込み、ワンボードコンピューターに ROM を装着して動作させている。現在のところプログラムはすべてアセンブル言語で書かれているため、変更は容易でない。将来はプログラムを BASIC または C 言語等の高級言語に移植し、開発効率を上げる予定である。

§ 4. 地震観測用高精度時計の検定

試作した GPS 時計の性能を検査するため、JJY によ

り自動校正をおこなう地震観測用時計（エコー計測 AQ-1000E、精度 ± 3.5 ms）と比較した、Fig. 6 には約 2 日間にわたって 1 号機と時間差をとった結果を示す。このように、両者の時間差の標準偏差は 2 msec 以下であり、今回試作した時計は地震観測用の高精度時計としては十分な性能を有していると言える。

GPS 時計の精度は、通常時動作させている温度補償型水晶発振器の精度と校正の頻度に依存する。温度補償型水晶発振器の精度は発振周波数をどの程度まで定格値に近づけることができるか、どのように実装するかといによって精度が異なる。この 1 号機は精度 ± 2 ppm の温度補償型水晶発振器を検定することなくそのまま用いており、GPS 受信機による校正の頻度は 1 時間毎である。GPS 時計の精度を更にあげるには、1) 水晶発振器を高精度なものに変更する、2) 水晶発振器の周波数を定格値にできるだけ近づけ、実装する際にも断熱材で覆う等の工夫をおこなう、3) GPS 受信機による校正の頻度を多くするなどの方法で比較的容易に実現できる。

勿論 GPS 受信機による校正の頻度はソフトウェアにより変更可能であるから、同じ精度の時計を製作するにも、高精度の水晶を用いて校正の頻度を下げるか、安価で低精度の水晶を用いて校正の頻度を上げるかを選択できる。高精度の水晶発振器は高価で入手が困難である。一方、GPS による校正の頻度を上げると消費電力が大きくなる。この時計ではソフトウェアの変更により価格、消費電力等を考慮して、使用目的、使用環境に合った最適なシステムを作ることが可能である。

§5. 最後 に

以上のように GPS 受信機基板を用いて地震観測用高精度時計を作製したところ、§1 で述べた必要要件を満足しているものが容易に、かつ安価（総額約 20 万円）に出来上がった。また、時計を制御するプログラムも独自に開発したため、その性能や機能を変更することも可能である。

また、GPS 受信機は世界中どこでも利用できるから、この GPS 時計は海外での地震観測にも大いに利用できる。我々がアフリカのザイール共和国に設置している広帯域地震計〔森田・他 (1992)〕の時計にもこの GPS 時

計が利用され、今なお正常に動作し続けているとのことである。開発途上国では機器の故障のよりも、機械の扱いに不慣れなオペレーターが初期設定の方法を誤ったり、スイッチを押し忘れたりして機器が正常に動作しないことが多いので、初期設定が不要で自動校正する（メンテナンスフリー）の時計は極めて有用である。

更に、テレメータの送信側に GPS 時計のタイムコードを入力して受信側で別の GPS 時計の時刻と比較してテレメータの伝送遅れを計測したり、別々の観測点の時計を GPS 時計を用いて一致させ、両観測点のデータを同期させて AD 変換するシステムを作るなどの付加価値の高い利用法も可能であり、今後の課題としたい。

謝 辞

（株）近計システムの高畠一徳氏にはマグナボックス社製 GPS 受信機基板を入手する際に便宜をはかって頂きました。また、この基板を検定するにあたり、国立天文台水沢観測センターの方々に大変お世話になりました。特に、堀合幸次、田村良明の両氏には多大なご協力を頂きました。記して謝意を表します。

この研究費用の一部は科学研究費補助金一般 (B) (課題番号 03452055) によった。

文 献

- 堀合幸次・田村良明・佐藤克久・原 忠徳, 1989, トリプル社製 4000SX による GPS を用いた時計比較, GPS ワークショップ 1989 年集録, 74-79.
- 森田裕一・浜口博之・N. ZANA, 1992, アフリカ大陸での広帯域地震観測, 月刊地球, 14, 721-728.
- 日本測地学会編著, 1989, 新訂版 GPS—人工衛星による精密測位システム—, 日本測量協会, 272 pp.
- 田村良明・原 忠徳・堀合幸次・藤下光身・佐藤克久, 1988, 緯度観測所における GPS を用いた時計比較・精度測位計画, 1988 年度経緯度・GPS・第 3 回 VERA 研究会集録, 223-229.
- 土屋 淳・辻 宏道, 1991, やさしい GPS 測量, 日本測量協会, 376 pp.
- 山崎利孝・藤本真克・池田平輔・宗円清明・武地美明, 1991, 廉価板 GPS 受信機を用いたタイムトランスファー, 天文学に関する技術シンポジウム 1991 収録, 104-108.